

NUEVAS APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA SONAR EN LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES: MEDICIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD Y MONITOREO DE DESGASTE DE LA PARED DE LA CAÑERÍA EN LÍNEAS DE HIDROTRANSPORTE

Robert J. Maron¹
Mark Fernald²
Dr. Christian O'Keefe³
John Viega⁴
Tim Bailey

CiDRA Minerals Processing Corp.
50 Barnes Park North
Wallingford, CT 06492, U.S.A
01-265-0035
Teléfono: www.cidra.com

¹Director, Desarrollo de Negocios e Ingeniería de Aplicación, América Latina (Autor corresponsal)

²V.P. Tecnología Avanzada

³Director, Desarrollo Negocio Regional e Ingeniería de Aplicación

⁴V.P. Gerente General, Servicios en Arenas Asfálticas

RESUMEN

La tecnología no invasiva de medición de flujo concebida sobre un arreglo sonar ha estado disponible por aproximadamente cinco años en los procesos industriales y se está convirtiendo un método aceptado de medición en los complejos flujos de fase única y de fase múltiple de la industria de procesamiento de minerales. Esta tecnología sensora y de medición ha sido también extendida a dos desarrollos que posibilitan nuevas capacidades de medición útiles para monitorear y administrar los flujos de pulpa y medir la pérdida de cañería causada por los flujos corrosivos.

El primer desarrollo corresponde a una medición no invasiva del perfil del flujo de pulpa en tiempo real en cañerías horizontales. Los sensores múltiples no invasivos miden las velocidades localizadas y se combinan para proporcionar una medición de perfil de velocidad. Esta información puede utilizarse para determinar la aproximación y el inicio de la deposición de sólidos en el fondo de la cañería. Tener esta información en tiempo real puede permitir operar a velocidades menores y/o mayor concentración de sólidos, a la vez que se evita la deposición de sólidos y los costos operacionales asociados. Un ejemplo del beneficio de este sistema es la operación de la línea de desechos con mayor densidad de sólidos para reducir el uso de agua.

El segundo desarrollo corresponde a la medición no invasiva del desgaste de la cañería en tuberías de pulpa sin revestimientos internos. Actualmente esas mediciones se hacen con calibradores de espesor portátiles ultrasónicos que presentan problemas por la escasa repetibilidad y deficiente precisión que ofrecen, además del alto costo de mano de obra que demandan. El sistema sonar utiliza un anillo no invasivo que permanece instalado con doce sensores ultrasónicos de espesor de pared equitativamente espaciados alrededor de la circunferencia. Las mediciones simultáneas proporcionan una "foto" del espesor de la pared de la cañería alrededor de toda su circunferencia. El beneficio resulta ser un monitoreo significativamente mejorado, una operación segura y se evitan los tan costosos daños ambientales causados por las filtraciones en las cañerías desgastadas.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, las mediciones de flujo en la industria de procesamiento de minerales han sufrido limitaciones impuestas por la tecnología de los flujómetros existentes incluyendo los instrumentos comúnmente utilizados tales como medidores ultrasónicos, medidores magnéticos, medición por turbina, medidores de placas de orificio, medidores de flujo de vórtice, Coriolis y Tubo de Venturi. La tecnología de medición de flujo, que ingresó a la industria del procesamiento de minerales hace unos tres años atrás, ha superado muchas de estas limitaciones. El desarrollo de esta tecnología comenzó hace unos 10 años atrás con el objetivo específico de obtener un sistema no invasivo de medición de los flujos de fases múltiples en la industria del petróleo. Posteriormente se adoptó la misma tecnología en la industria del procesamiento de minerales donde ha experimentado una rápida adhesión.

La tecnología específica del sensor, basada en la disposición de sensores piezo-eléctricos, proporciona capacidades únicas de medición. La primera de éstas es la capacidad medir en forma no invasiva velocidades localizadas de flujo dentro de una cañería. Utilizando este principio, el arreglo circunferencial de estos sensores puede medir varias velocidades simultáneamente en un punto axial único, entregando entonces, un perfil de velocidad en tiempo real.

Una segunda aplicación de esta tecnología sensora nuevamente utiliza un arreglo circunferencial de sensores piezo-eléctricos permanentemente instalados para obtener mediciones múltiples del espesor de la cañería un punto axial único, proporcionando así medios de alta precisión y repetibles para monitorear el desgaste de la cañería por causa de la pulpa abrasiva.

Medición de Flujo Basada en Tecnología Sonar – Principio de Operación

Aunque existen diversas perturbaciones relacionadas con los flujos de proceso, la más común es la turbulencia. Los remolinos turbulentos, o vórtices, existen en forma natural en los sistemas de flujo donde los números de Reynolds son mayores a 4000. Los números de Reynolds representan la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Los números mayores a 4000 se consideran turbulentos y los inferiores a 2000 son considerados como laminares. Mientras mayor sea el número de Reynolds mayor será el rango de remolinos turbulentos dentro del flujo. El principio fundamental de la medición sonar de flujo se basa en el rastreo de estos remolinos turbulentos, o bien, en las presiones inconstantes que atraviesan el arreglo de sensores. [1] El campo de presión turbulenta dentro de la una cañería ejerce fuerzas sobre el interior de la pared de la cañería y estas fuerzas son distintas tanto espacial como temporalmente. La presión que estas fluctuaciones inducen dentro de la pared de la cañería es medida con un arreglo de sensores que se instalan en disposición axial en el exterior de la pared. Los sensores convierten la presión en señales de voltaje que contienen información tanto de la fase como de la frecuencia. La separación entre los sensores del arreglo es menor que la longitud de coherencia de los vórtices, resultando entonces en señales de voltajes similares para cada sensor con sólo una demora en tiempo. Cuando el procesamiento a través del arreglo sonar se aplica a las señales de salida del arreglo, la velocidad de propagación de flujo dentro de la cañería puede ser determinada. [2]

Perfil de Velocidad

Este amplio rango de remolinos turbulentos puede ser visualizado como un campo de presión inestable dentro de una cañería que forma un perfil de velocidad distinto a través de la sección cruzada de la cañería. Este perfil representa la velocidad promediada en el tiempo del campo vortical y depende de la ubicación radial dentro de la cañería. La forma del perfil depende del número de parámetros tales como las propiedades del líquido, geometría y orientación de la cañería, terminación de la superficie y tasa de flujo. En los flujos de líquidos homogéneos totalmente desarrollados, el perfil es simétrico alrededor del eje de la cañería.

En las aplicaciones en minería y arenas asfálticas la mayor parte del transporte de producto es realizado como pulpa. La mayoría de estas líneas de transporte a su vez están dispuestas en forma horizontal lo que provoca que los sólidos se estratifiquen con una mayor concentración en el fondo de la cañería. Los regímenes de flujos horizontales pueden ser clasificados en cuatro distintos grupos: Flujos homogéneos con partículas completamente suspendidas, flujos heterogéneos con todas las partículas suspendidas con lecho móvil y flujos con lecho estacionario [3]. El régimen de flujo depende de las propiedades de la

pulpa tales como el tamaño de partícula, densidad, velocidad de flujo, viscosidad y distribución de tamaño de partícula, así como también de los atributos físicos de la tubería, como el diámetro y la aspereza de la superficie. Cada uno de estos regímenes de flujo tiene diferentes características de perfil de velocidad.

MEDIDOR DE PERFIL DE VELOCIDAD DE SONARTRAC CON SISTEMA DE ABRAZADERA

Las mediciones basadas en tecnología sonar con sistema de abrazadera están volviéndose ampliamente utilizadas en las aplicaciones industriales donde se procesan pulpas. Una de las muchas ventajas de esta tecnología es que el arreglo sensor de flujo está abrazado al exterior de la cañería y por lo tanto nunca entra en contacto con la pulpa. Esto evita tener que detener el flujo de proceso para la instalación y elimina el problema tan común del desgaste por causa de la naturaleza agresiva de la pulpa que fluye. El medidor de flujo de abrazadera tipo estándar se basa en el uso de un arreglo único de elementos múltiples que mide la velocidad del flujo, que es convertida en flujo volumétrico a partir del diámetro interior de la cañería, y en fracción de gas por volumen, midiendo la velocidad acústica dentro del líquido. Esta tecnología de tipo abrazadera ha sido extendida implementando múltiples arreglos ubicados en diferentes posiciones radiales en un mismo medidor para medir el perfil de velocidad del líquido. Esta nueva herramienta ofrece a los operadores de proceso una herramienta de medición no invasiva que tiene la capacidad de monitorear y controlar el perfil de sus flujos de proceso. Este informe resume los resultados de pruebas de circuitos de flujo realizadas en un sistema Sonartrac™ de determinación de perfiles y demuestra algunos de los beneficios potenciales, uno de los cuales corresponde a la habilidad de detectar el inicio de condiciones de bloqueo por arenas. La detección temprana de esta condición permite a los operadores aplicar oportunamente las acciones correctivas y evitar catastróficas detenciones de proceso. Además, el monitoreo del perfil puede entregar información muy útil sobre las propiedades del líquido de proceso que puede permitir a los operadores ajustar las variables de producción para optimizar el proceso.

CiDRA Corporation ha desarrollado un nuevo sistema para determinar perfiles llamado SANDtrac™. Este sistema utiliza arreglos múltiples radialmente instalados en la parte superior, a 45 grados, 90 grados, 135 grados y en el fondo de la cañería. En la Figura 3 se puede observar la ubicación circunferencial del arreglo sonar. La velocidad local de cada arreglo sensor se mide en forma simultánea. En la medida que ciertas propiedades de la pulpa cambian, el perfil de flujo puede ser monitoreado en tiempo real para permitir que los operadores puedan realizar el control correspondiente para optimizar el proceso. Uno de los ejemplos informados en este documento es la capacidad para detectar los elementos precursores de un episodio de “bloqueo por arenas” en las cañerías a través del monitoreo del perfil de velocidad.

Circuito de Flujo y Configuración de Prueba

Se realizó una prueba en un circuito de prueba de pulpa, mostrado en la Figura 1, en el Centro de Tecnología de Flujos en Cañerías del Consejo de Investigación Saskatchewan (SRC) en Canadá.

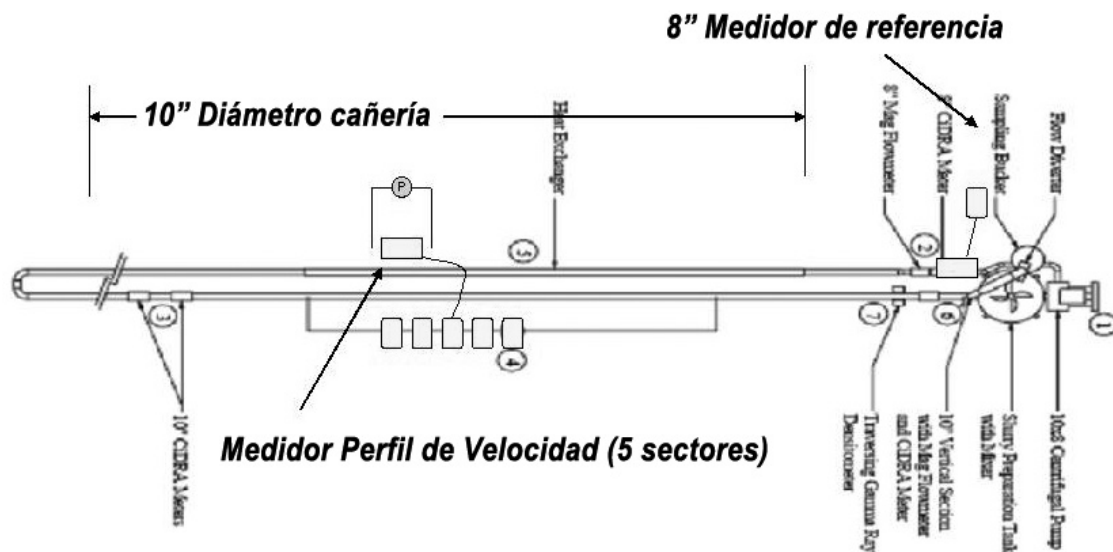


Fig. 1: Configuración Circuito de Prueba

Resultados de Prueba

Pulpas Sometidas a Pruebas

El alcance era someter a esta prueba las pulpas representativas tanto de las aplicaciones en minería como en arenas asfálticas. Para la pulpa de aplicación en minería se seleccionó un tamaño de partícula de 89 μ m d50 con una densidad de 1300 Kg/m³. La pulpa de arenas asfálticas fue primeramente sometida a prueba con una pulpa de arena de cuarzo con partículas de 186 μ m. Posteriormente se agregó arcilla y piedras de mayor tamaño a la mezcla. Se realizó una prueba de reducción de velocidad en cada pulpa para medir el perfil de velocidad como una función de la velocidad.

Resultados de Pruebas en Pulpas de Minería

A continuación se grafican los resultados de la prueba realizada a la pulpa de minería (Fig. 2). La velocidad fue reducida en la siguiente secuencia para desarrollar un lecho de arena – 4 m/seg, 3 m/seg, 2 m/seg, 1,75 m/seg, 1,5 m/seg, 1,4 m/seg, 1,3 m/seg, 1,2 m/seg, 1,1 m/seg, 1,0 m/seg, 0,9 m/seg, 0,8 m/seg, y 0,7 m/seg. El flujo se mantuvo a la tasa por un período de 5 minutos para permitir que el circuito se estabilizara. La información del flujo continuo fue registrada durante todo el tiempo de ejecución de la prueba. La Fig. 2 muestra la reducción de la tasa de flujo y las velocidades correspondientes medidas en cada una de las posiciones del arreglo de 5 sensores. También se muestran los resultados de un medidor de densidad instalado en el fondo ($y/D=0,05$) de la cañería para medir los sólidos que se estratifican ahí. Para obtener una velocidad de flujo de referencia, se instaló un flujómetro separado en una sección de 8" en el circuito donde la mayor velocidad del flujo impedía la deposición de sólidos. Luego, esta tasa de flujo fue convertida a una velocidad "equivalente de 10 pulgadas" y se graficó con la información de perfil de velocidad que se muestra en la Fig. 2.

En la medida que la tasa de flujo desciende, el perfil de velocidad cambia para reflejar los cambios de estratificación dentro de la cañería. Se puede observar que en la medida que la tasa de flujo disminuye, la lectura del medidor de densidad aumenta sólo levemente hasta aproximadamente 1,75 m/seg. A esta velocidad las lecturas de densidad sufren un cambio que refleja un aumento de los sólidos existentes en el fondo de la cañería.

Se puede observar una buena concordancia entre el rápido aumento de la lectura del Medidor de Densidad Gamma (ajustado para medir la densidad a través del fondo de la cañería) y la inversión de los sensores inferiores. Ambos indican la formación de un lecho al mismo tiempo. Cuando la tasa de flujo cae por debajo de la velocidad de deposición se comienza a formar un lecho en el fondo de la cañería y el

medidor de densidad Gamma detecta este rápido aumento de densidad. El sensor del fondo en el medidor de perfil lee típicamente una velocidad inferior que el sensor instalado a 135 grados, esto porque las pulpas generalmente se estratifican y las capas inferiores son más densas y se mueven más lentamente. Cuando el lecho del fondo deja de moverse, el sensor no puede detectar más la capa inferior y busca una más alta en la cañería donde la velocidad es mayor, esta condición puede causar que las velocidades informadas por los sensores inferiores resulten más similares o incluso invertidas (la lectura de fondo más alta que la lectura del sensor instalado a 135°). La Fig. 3 muestra una vista detallada de la ocurrencia de deposición de sólidos. En las Figuras 3-5 se observan los perfiles de velocidad a tres diferentes velocidades de flujo cada uno mostrando tres distintos regímenes de flujo: Régimen homogéneo con todas las partículas suspendidas (Fig. 4), flujo heterogéneo con todas las partículas suspendidas (Fig. 4) y flujo con lecho estacionario (Fig. 5).

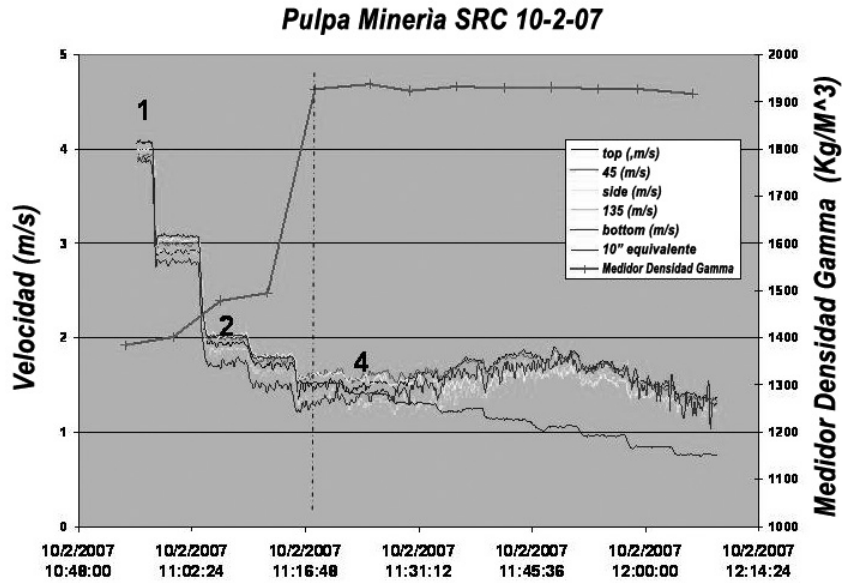


Fig. 2: Ciclo completo, pulpa de minería

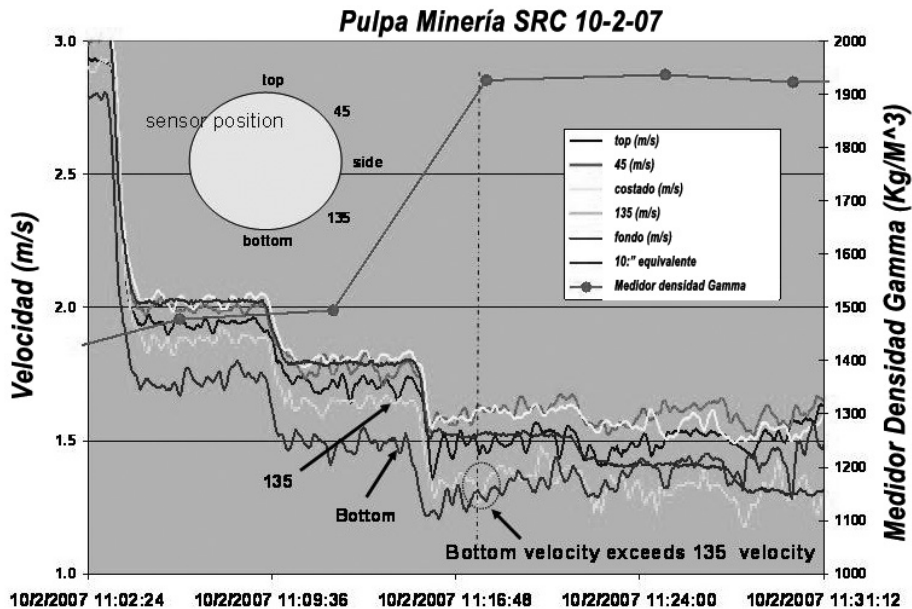


Fig. 3: Vista aumentada, pulpa de minería

A continuación se grafican los perfiles de velocidad seleccionados para diferentes velocidades de referencia:

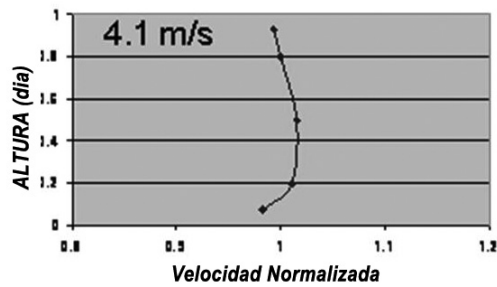


Fig. 4: Flujo Homogéneo, partículas suspendidas

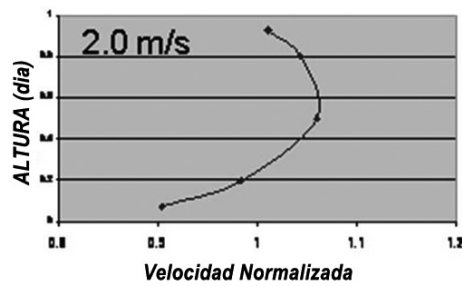


Fig. 5: Flujo heterogéneo, partículas suspendidas

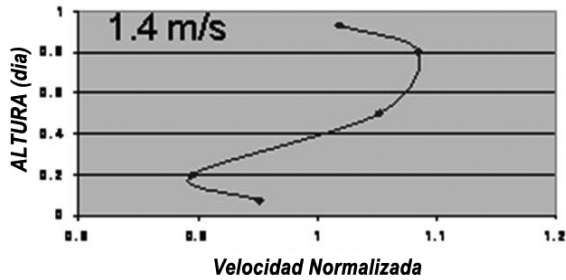


Fig. 6: Lecho estacionario de sólidos

Resultados de Pruebas en Pulpas Arenas Asfálticas

Para comparar con la pulpa de minería de 89 μm descrita anteriormente, en la Fig. 8 se muestra una prueba de reducción realizada con la pulpa de arenas asfálticas de 186 μm . Nuevamente, en la medida que la tasa de flujo desciende, el perfil de velocidad cambia para reflejar los cambios de estratificación dentro de la cañería. Se puede observar que en la medida que la tasa de flujo disminuye, la lectura del medidor de densidad permanece relativamente constante en 1600-1700 Kg/m^3 hasta que aproximadamente a 2,5 m/s sufre repentinamente un cambio que refleja un aumento de sólidos en el fondo de la cañería. Adicionalmente, la Fig. 7 muestra la caída de presión medida a través del medidor de perfil de velocidad, que, en este caso, muestra un repentino aumento que coincide con el aumento del medidor de densidad y la “inversión de velocidad” del fondo y el arreglo del medidor de perfil de velocidad instalado a 135 grados. Por lo tanto, la formación del lecho estacionario de sólidos fue detectada por el medidor sonar de velocidad y confirmada tanto por la medición de densidad como por la medición de diferencial de presión.

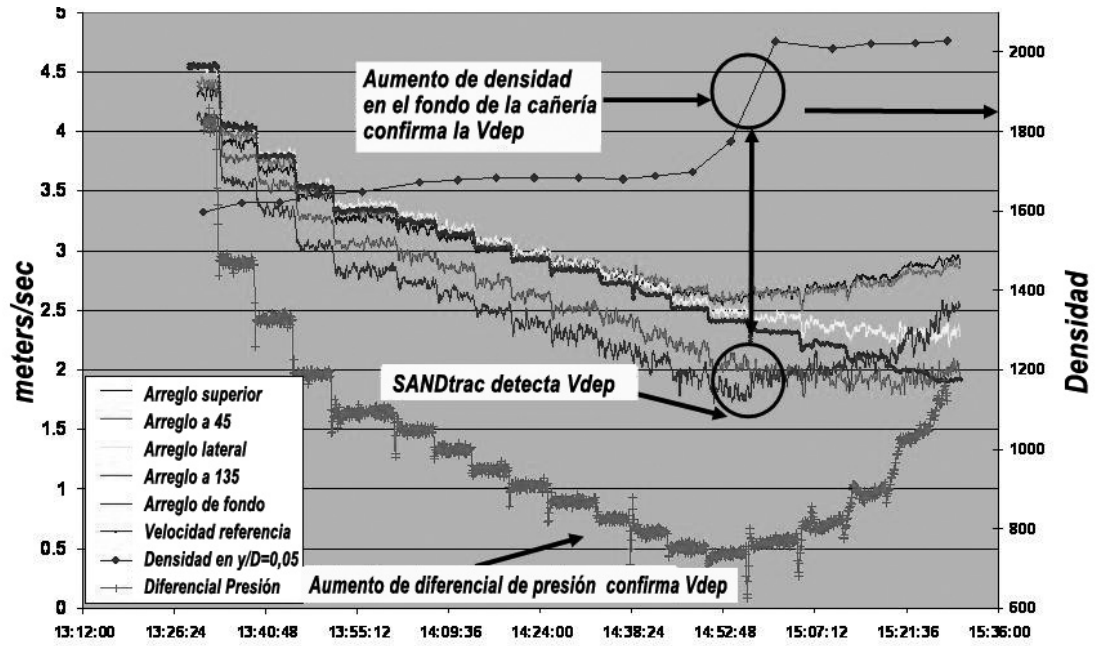


Fig. 7 Deposición de sólidos detectada por medidor sonar, medidor de densidad, Delta-Pressure (diferencial del presión)

En la Fig. 9 se muestra el perfil de velocidad versus la velocidad del flujo de referencia y la Fig. 10 muestra una representación donde todas las velocidades están normalizadas con respecto de la velocidad del centro. La gráfica de la Fig. 10 enfatiza cómo los efectos del flujo estratificado impactan el perfil de velocidad. Juntas, estas representaciones muestran que como la tasa de flujo está reducida, ocurren dos cambios distintos en el perfil. El primer cambio es la velocidad detectada en el fondo de la cañería, que es la menor por causa de la concentración de sólidos, es menor con relación a la velocidad al centro de la cañería. Así también, las velocidades medidas en la sección superior de la cañería comienzan a moverse más rápido con respecto del centro de la cañería. El segundo cambio es que en la medida que la velocidad descende, los sólidos se depositan en el fondo de la cañería causando la "inversión de velocidad" entre el fondo y los arreglos instalados a 135 grados, como se describió anteriormente.

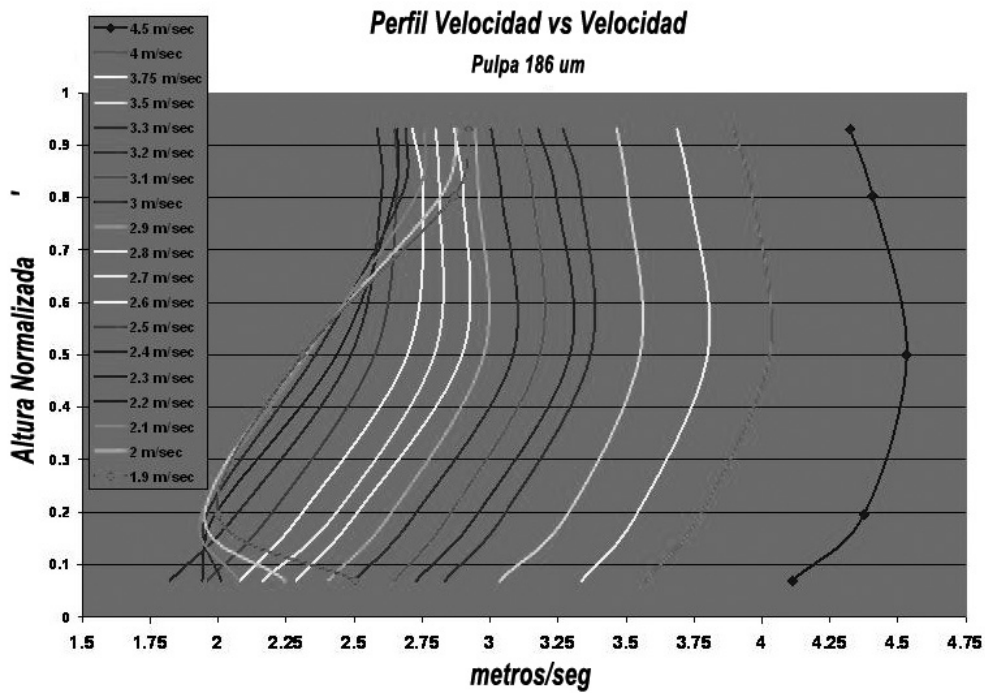


Fig. 8: Perfiles de velocidad vs. velocidad de referencia

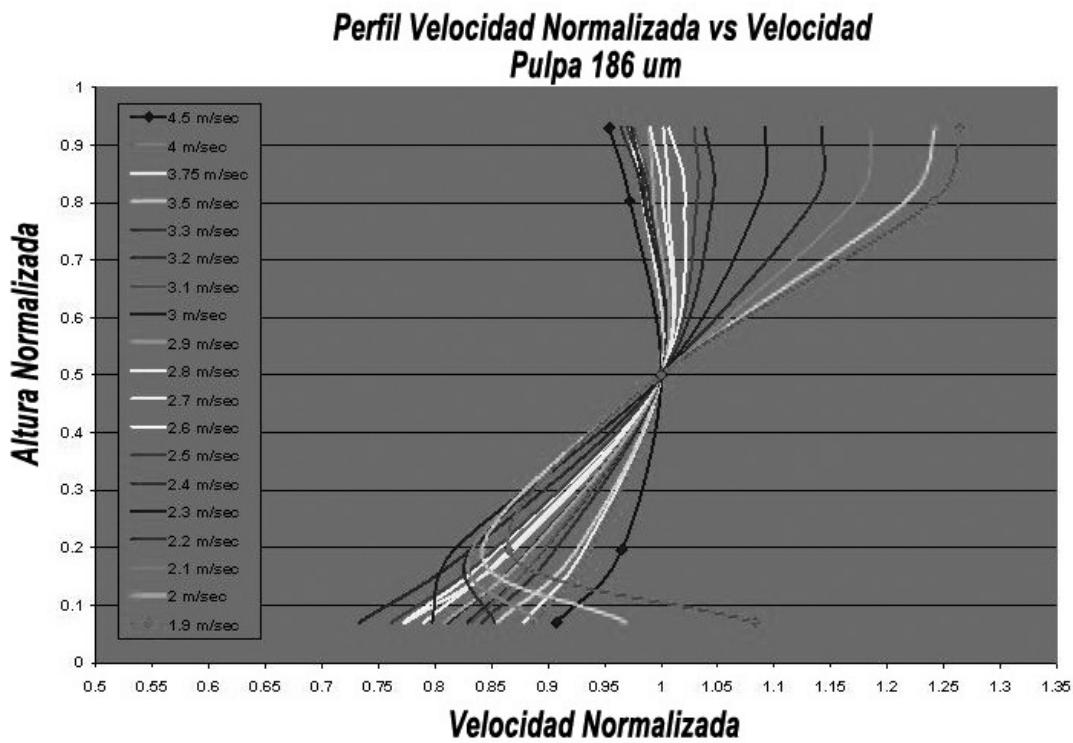


Fig. 9: Perfiles de velocidad (normalizada a velocidad de centro de cañería) vs. velocidad de referencia

MONITOREO DE ESPESOR DE PARED DE CAÑERÍA

Una larga historia tiene la realización de pruebas con elementos ultrasónicos no destructivos para determinar el espesor de la pared de las cañerías metálicas. A la fecha, el uso de este método para determinar el espesor de la pared ha resultado costoso, poco confiable y con muchas limitaciones para

definir las tendencias de las tasas de desgaste. Para reducir el alto costo de mano de obra asociado a este método y para disminuir las variaciones que se producen en estas mediciones que se realizan manualmente, se ha desarrollado y probado un nuevo enfoque en el monitoreo de espesor de pared. El nuevo sistema, HALO™, ha ofrecido resultados de costos de mano de obra reducidos, mejor repetibilidad de medición y mediciones de desgaste de cañerías más oportunas. También ha permitido realizar las mediciones a paredes de cañerías donde los inspectores no podrían ejecutarlas actualmente de forma segura y con facilidad. En la Figura 10 se muestra un arreglo de disposición conceptual del sistema.

Principio de Operación para el Monitoreo de Espesor de Cañería

El nuevo sistema de monitoreo de desgaste de cañería, HALO™, usa una serie de transductores ultrasónicos adaptables que son montados permanente o temporalmente alrededor del perímetro de la cañería. Estos transductores se acoplan a un pulsador/receptor ultrasónico que envía una señal eléctrica al transductor ultrasónico. El transductor ultrasónico convierte la señal eléctrica en una onda progresiva de tensión (onda acústica) que se propaga a través de la pared de la cañería, se refleja en la superficie interior de la cañería y retorna al transductor ultrasónico. Entonces el transductor ultrasónico reconvierte esta onda de tensión que retorna en una señal eléctrica que es amplificada y procesada por el pulsador/receptor ultrasónico. Luego, el pulsador/receptor ultrasónico determina la cantidad de tiempo que ha demorado la onda de tensión en recorrer desde el transductor a la superficie interna de la cañería y de regreso al transductor. Utilizando la ya conocida velocidad de estas ondas de tensión en el material de la pared de la cañería, el espesor puede ser determinado con precisión.

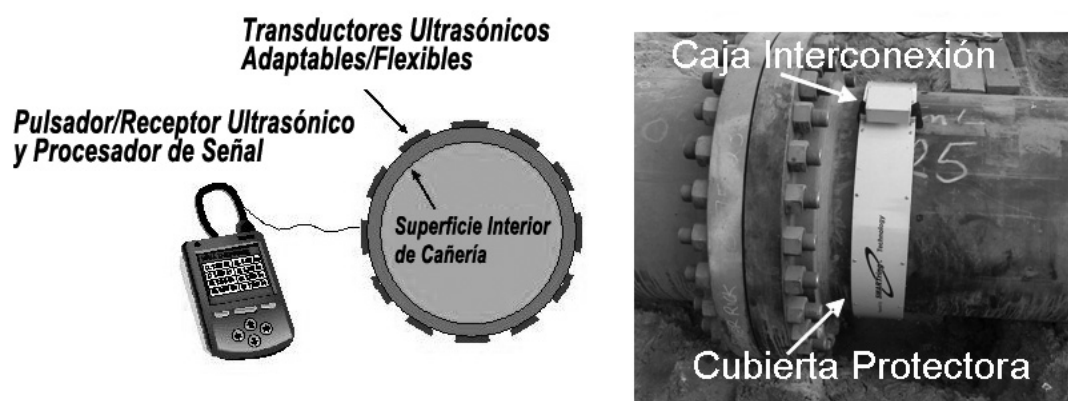


Figure 10: Disposición conceptual del sistema HALO™ y foto de sistema en operación en instalación de cliente

Resultados de Prueba – Temperatura y Capacidad de Repetición

Las mediciones de espesor de cañería pueden ser graficadas en una representación polar para proporcionar una indicación visual del espesor de pared como una función de la distancia angular desde la parte superior de la cañería. Un conjunto de representaciones gráficas de la información tomada en una faena de clientes muestra claramente las altas tasas de desgaste en las cañerías, como se ve en la Figura 11. Inequívocamente se puede observar el grado de desgaste. En el lado izquierdo de la figura xx se muestra que la alta tasa de desgaste aparece en el fondo de la cañería como es esperable en una situación de flujo estratificado (no homogéneo). En el lado derecho de la figura xx, la alta tasa de desgaste parece estar en la parte superior de la cañería causada por una rotación intencional realizada a la cañería para aumentar su vida útil. En otras situaciones, el desgaste disperejo será el resultado de los cambios de los perfiles de flujo después de los codos u otros efectos de la geometría de la cañería.

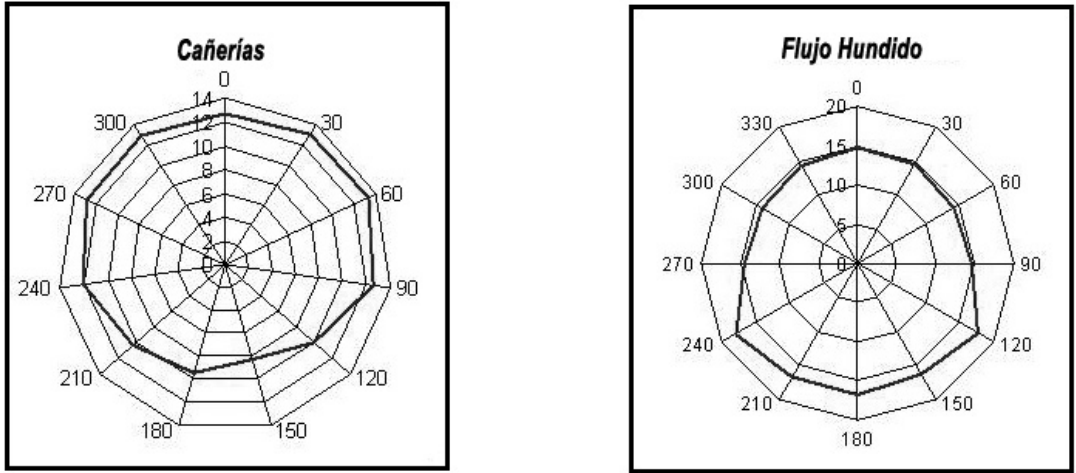


Figura 11: Espesor pared de cañería como función de la posición angular de la cañería como se aprecia en dos diferentes cañerías en la faena del cliente

Este sistema ha sido sometido a prueba para determinar la repetibilidad, impacto de los cambios de temperatura ambiental y el impacto de la variabilidad de transductor a transductor. Los resultados de la variación de estos tres factores han sido consolidados dentro de un conjunto único de datos como se muestra en la Figura 12. Un examen del gráfico revela que sobre el 81% de los datos está dentro del +/- 0,12% o +/- 0,013 mm, y todos los resultados están dentro de +/- 0,47% o +/- 0,05 mm. La repetibilidad está dentro de los requerimientos para determinar la falla inminente de la cañería por causa del debilitamiento del espesor de la pared o por las tasas de desgaste controladas con acuciosidad.

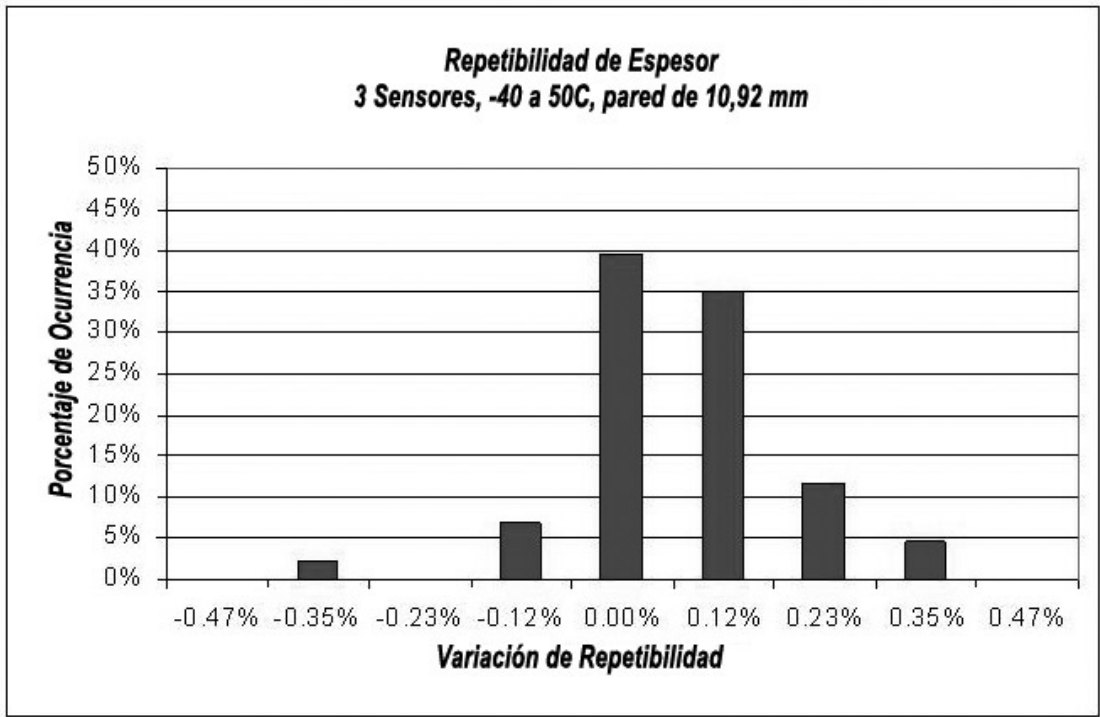


Figura 12: Se muestra una pequeña expansión en los datos sobre el rango de 90°C de temperatura y sobre tres sensores

Se ha demostrado en terreno la capacidad de monitorear y cuantificar las tasas de desgaste de las cañerías. En la Figura 13 una tasa de desgaste en un ambiente de alta corrosión muestra la rápida disminución del espesor de la pared en un período de nueve semanas y media.

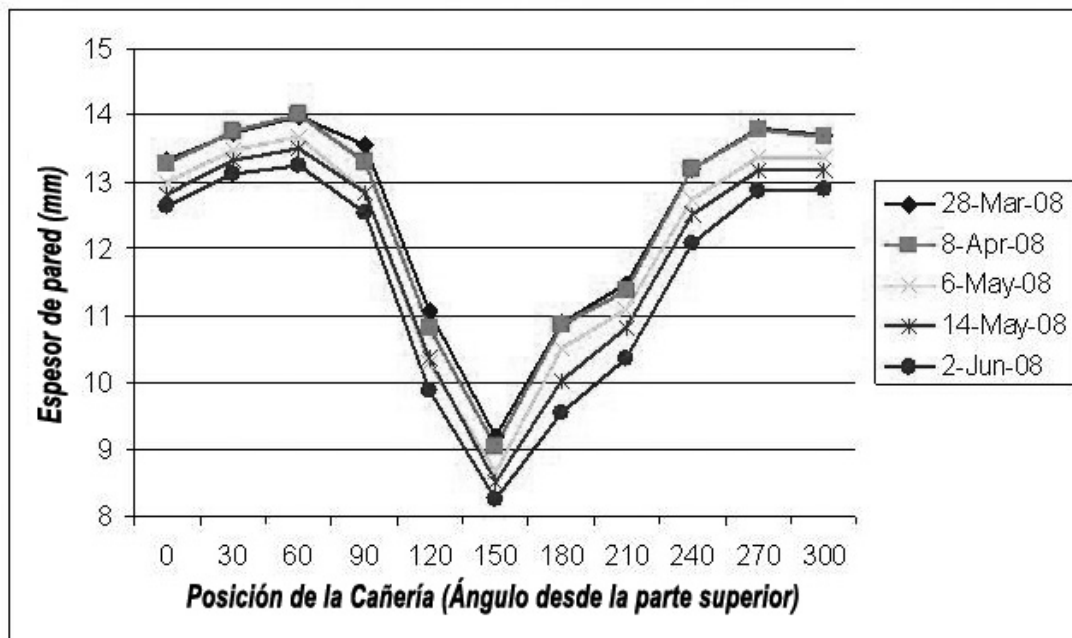


Figura 13: Medición de espesor de pared de cañería como función de la posición angular y el tiempo

CONCLUSIONES

La tecnología de medición de flujo basada en arreglo sonar que hoy existe ha sido extendida a dos nuevas aplicaciones. Se ha demostrado que un medidor con arreglo sonar puede medir el perfil de velocidad en tiempo real en una cañería horizontal para pulpa. Los cambios que se han medido en el perfil de velocidad muestran la capacidad para detectar diferentes regímenes de flujos: tanto flujos homogéneos como heterogéneos con partículas sólidas en total suspensión y flujos con lechos estacionarios. La capacidad de detectar un lecho estacionario fue confirmada por las mediciones separadas de densidad realizadas a través del fondo de la cañería y la presión diferencial a través del medidor de perfil de velocidad. Un beneficio potencial de esta medición para la operación de las líneas de hidrotransporte es la reducción de uso de agua y energía al operar con concentraciones más altas de sólidos y/o menores velocidades mientras que además se ahorran los problemas y costos ocasionados por la deposición de sólidos. La capacidad de proporcionar mediciones oportunas del espesor de la pared en forma confiable, precisa y efectiva desde la perspectiva de costos, ha sido demostrada. La repetibilidad sobre una variedad de condiciones de operación, incluyendo la variación de sensor a sensor, rangos de temperatura y tiempo, ha quedado claramente demostrada en las pruebas de laboratorio y las realizadas en terreno. Esta tecnología se expande fácilmente al monitoreo de la mayoría de las estructuras encontradas en una línea de cañerías, incluyendo codos, válvulas y muchas otras. Los ahorros resultantes en inspecciones de cañería y en la producción a través de una mejorada vida útil, son muy significativos. Más importante aun, el impacto potencial de los ahorros en materias de seguridad del personal y del medio ambiente será enorme.

REFERENCIAS

¹ Gysling, d. and Mueller, E. [2004] Application of Sonar-Based Clamp-On Flow Measurement in Oilsand Processing, ISA 2004 Exhibit and Conference.

² Nelson, R.O., "Sonar Signal Processing", Artech House Inc., Norwood, MA, USA, 2001, ISBN 0-89006-453-9.

³ Cheremisinoff, N.P., "Encyclopedia of Fluid Mechanics. Vol. 5, Slurry Flow Technology", Gulf Pub. Co. 1986.